

# 2

## Habitabilidad, eficiencia y resiliencia

Rolando Arturo  
Cubillos-González

Francisco Javier  
Novegil-González-Anleo

Oscar Alfonso  
Cortés-Cely

Introducción 2 .....	42
Efectos del cambio climático derivados del impacto ambiental, del sector de la construcción en Bogotá .....	43
La utilización de procesos y materiales constructivos, que afectan la habitabilidad de las edificaciones dentro del hábitat urbano de Bogotá .....	45
Clasificación de materiales de construcción .....	46
Indicadores de impacto ambiental .....	46
Selección y ciclo de vida de materiales en la construcción .....	47
Etapas del ciclo de vida de los materiales .....	48
Evaluación de impacto ambiental .....	50
Metodologías de evaluación de los materiales de estudio .....	51
Hacia la resiliencia y eficiencia de materiales para la arquitectura .....	52
Materiales resilientes .....	52
Métodos de ensayo para cuantificar las propiedades mecánicas .....	55
Cálculo de la resiliencia a partir de la curva esfuerzo vs deformación .....	60
Ensayo Charpy .....	60
Análisis de la superficie de fractura en función de la temperatura .....	62
Resiliencia: una estrategia de adaptación para enfrentar el cambio climático en Bogotá .....	64
El concepto de habitabilidad .....	65
Flexibilidad .....	65
Los patrones sociales .....	66
Modelo de habitabilidad .....	66
Calidad de los edificios .....	66
Calidad de vida .....	67
Modelo de administración de ambientes resilientes .....	68
Tecnología resiliente .....	68
Patrones adaptativos al cambio climático .....	69

## Introducción 2

El propósito de este capítulo es describir, de manera más detallada, el comportamiento de los conceptos de habitabilidad, eficiencia y resiliencia aplicados a la ciudad de Bogotá, para relacionar el concepto de cambio climático con los conceptos anteriormente mencionados. Este capítulo está dividido en cuatro partes. En la primera parte se describen brevemente los efectos del cambio climático, derivados del impacto ambiental del sector de la construcción en Bogotá. La segunda parte da respuesta a la utilización de procesos y materiales constructivos que afectan la habitabilidad de las edificaciones, dentro del hábitat urbano de Bogotá. La tercera expone cuáles serían los recursos para enfrentar, de una manera diferente, el mejoramiento de la habitabilidad frente al cambio climático en Bogotá. Finalmente, se concluye el capítulo con la descripción del concepto de resiliencia, como una estrategia de adaptación para enfrentar el cambio climático en Bogotá.

## Efectos del cambio climático derivados del impacto ambiental, del sector de la construcción en Bogotá

Según el reporte *Ciudades y cambio climático en Colombia* (García *et ál.*, 2013), se identificó que Colombia es un país mayoritariamente urbano, concentrando más del 70% de su población en las ciudades, especialmente en la Región Andina y, en segundo plano, en la Región Caribe, representando aproximadamente el 80% de la población urbana del país. El sistema urbano de las ciudades colombianas se encuentra caracterizado por la primacía de la ciudad capital, Bogotá, seguida de tres ciudades –Medellín, Cali y Barranquilla– con poblaciones entre 1 y 5 millones de habitantes. Además de 33 ciudades intermedias, con poblaciones entre 100.000 y 1.000.000 de habitantes, y más de 1000 centros urbanos con menos de 100.000 habitantes.

Dentro de los hallazgos encontrados en el reporte, se destacan (García *et ál.*, 2013):

- La ola invernal de 2010-2011 fue un detonante importante para poner en la agenda el tema del cambio climático y el riesgo en las ciudades colombianas

- El apoyo técnico y financiero de entidades nacionales e internacionales, el cual ha contribuido a desarrollar acciones de cambio climático en las ciudades y al desarrollo de insumos para su gestión.
- La Ley 1523 de 2012 ayuda a fortalecer la autonomía de las entidades territoriales en el conocimiento, la mitigación y el manejo local de los riesgos climáticos, al adoptar una política nacional de gestión del riesgo de desastres. Aunque las ciudades cuentan con geografía y condiciones particulares, los riesgos climáticos que enfrentan son similares.
- Es importante que las ciudades implementen un enfoque de aprendizaje de política pública sobre el cambio climático.
- Hay vacíos importantes en las capacidades técnicas de las ciudades, para generar y procesar información climática y sobre riesgo, especialmente en términos prospectivos.
- Hay debilidades en procesos de inclusión y participación de las comunidades y la sociedad civil.

En el caso particular de Bogotá, el tema del cambio climático es reciente y necesariamente está ligado a los procesos de densificación y de planeamiento territorial. Efectivamente, el estudio resalta (García *et ál.*, 2013) que la articulación conceptual entre el cambio climático y el ordenamiento territorial es una necesidad que debe ahondarse desde la visión de la protección de la biodiversidad. El manejo integral de la biodiversidad debería tener una definición clara en el uso del suelo y los procesos de densificación.

Por ejemplo, a pesar de que el POT fue creado en el año 2000, este documento y sus revisiones posteriores, en los años 2003 y 2004, no comprendían el concepto de cambio climático dentro de su formulación, ya que el tema, en su época, no tenía la misma importancia que ahora se le da. Al respecto, la modificación extraordinaria realizada al POT de Bogotá en agosto de 2013 buscó incorporar un nuevo capítulo dedicado a la gestión de riesgos y al cambio climático, en concordancia con lo dispuesto en la Ley 1523 de 2012.

Igualmente, el énfasis del distrito alrededor del cambio climático se dirigió a reducir la exposición y la vulnerabilidad de la ciudad frente al fenómeno. Efectivamente, el artículo 94 de la Ley menciona la “resiliencia a los impactos adversos potenciales de los extremos climáticos” (Colombia, Ley 1523, 2012, art. 94). Asimismo, en el artículo 95 de dicha Ley se definieron los conceptos que articulan la gestión de riesgos y el cambio climático en Bogotá, como son: amenaza, vulnerabilidad, vulnerabilidad al cambio climático, riesgo público, cambio climático, resiliencia y territorios resilientes.

Dentro de este tema, hay que resaltar que los objetivos estaban orientados a la reducción de riesgos debidos a la inadecuada localización de la población, el incorrecto uso, diseño y construcción de edificaciones e infraestructuras, lo que origina una alta necesidad de resiliencia en la ciudad y convierte este concepto en un nuevo factor de análisis. Desde la perspectiva de la adaptación al cambio climático, la resiliencia aporta nuevas variables que apuntan a la eficiencia integral de la edificación. El análisis de este factor nos permite evaluar los riesgos y

el impacto que genera la arquitectura sobre la estructura urbana (Cortés & Cubillos, 2014).

Para ello, toma vital importancia el estudio de respuestas que permitan una adecuada solución a la necesidad de adaptación de las edificaciones al cambio climático en la ciudad de Bogotá. Por tanto, es conveniente tener en cuenta que dichas estrategias deben estar orientadas a la construcción de una ciudad resiliente, que admite el proceso de densificación originado por la demanda del crecimiento poblacional, sin que se afecte su capacidad de habitabilidad en los espacios edificatorios o los espacios públicos (Cubillos & Rodríguez, 2013).

En este aspecto, lo primordial es orientar el diseño de las nuevas edificaciones y la rehabilitación de las antiguas hacia el concepto de edificio resiliente, el cual debe responder al cambio climático por medio de estrategias resilientes y principios de sostenibilidad (Cubillos & Rodríguez, 2013). Por ejemplo, el desarrollo de las estrategias resilientes podría conducir al desarrollo de tecnologías que puedan mejorar la condición de confort térmico en los espacios, con un bajo impacto ambiental. Para ello, se hace necesario el estudio de los procesos y materiales constructivos que afectan la habitabilidad de las edificaciones.

## La utilización de procesos y materiales constructivos, que afectan la habitabilidad de las edificaciones dentro del hábitat urbano de Bogotá

Los procesos constructivos y el empleo de materiales de construcción varían en el contexto mundial con las nuevas dinámicas de expansión urbana, las transformaciones sociales y económicas y, principalmente, por el impacto que genera la industria de la construcción en los sistemas ambientales. Dicho impacto ha ido transformado los ecosistemas a medida que crece la ciudad, aumentando el uso de recursos no renovables y la demanda de energía y agua. En esta línea de crecimiento y expansión, las ciudades y sus habitantes se enfrentan a cambios de paradigma, donde la innovación, en términos de procesos de adaptación y mitigación al cambio climático, a la explosión demográfica y al uso de los recursos naturales para la construcción y la incorporación de nuevos materiales, permita la eficiencia y la gestión de los residuos para la construcción de un hábitat sostenible.

Las cargas ambientales, que están asociadas a los impactos generados por la industria de la construcción y su alto impacto, derivan del uso indiscriminado de recursos no renovables y la implementación de energías fósiles, principalmente de la obtención de productos derivados de la transformación de materias primas, el transporte, distribución y puesta en obra de los materiales que se emplean en la construcción de las edificaciones a escala global, regional y local.

Para centrar el análisis de los procesos y materiales constructivos que afectan la habitabilidad, y la calidad urbana y arquitectónica en Bogotá, se propone la implementación de la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV), como herramienta de análisis, evaluación y validación de resultados del impacto ambiental, generado principalmente en tres categorías: 1) salud humana, 2) calidad del ecosistema y 3) recursos.

Tabla 1. Clasificación de materiales en el contexto local, regional y mundial.

Clasificación de materiales de construcción				
	ICONTEC	México	EU	U.K.
A.	Concretos	Ferrosos	Metales y aleaciones	Metálicos
	Metales			
B.	Cerámicas y ladrillos	No ferrosos	Polímeros	Polímeros
C.	Agregados (piedras)	Orgánicos	Polímeros	Cerámicos y vidrios
	No metales	Maderas		Cerámicos
D.	Metales	Inorgánicos	Cerámicos	Compuestos
		Vidrios		Compuestos
E.	Maderas		Nanociencia	
F.	Vidrios		Semiconductores	
G.	Plásticos y sintéticos			

### Clasificación de materiales de construcción

El avance en la clasificación de materiales en el contexto nacional lo adelanta el ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación). Es el organismo encargado de la normalización, la certificación, la metrología y la gestión de la calidad en Colombia. La clasificación se establece a través de los materiales más empleados en la industria, y su aplicación y uso en la construcción (ver tabla 1).

### Indicadores de impacto ambiental

El DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) establece algunos parámetros de indicadores de impacto ambiental, no vincula los materiales que emplea la industria de la construcción, las estadísticas

solamente apuntan a establecer un monitoreo en cuencas hidrográficas y a la formulación, cálculo y validación de indicadores (DANE, 2015).

La otra institución encargada de formular y monitorear indicadores de impacto ambiental es la Secretaría Distrital de Ambiente, entidad que formuló los siguientes 5 tópicos que, de manera general, contribuyen a mitigar el cambio climático: Bogotá Construcción Sostenible, techos verdes y jardines verticales, franjas de control ambiental, sistemas urbanos de drenaje sostenible e infraestructura. Estos tópicos hacen parte de la óptica del Ecourbanismo. La formulación y el cálculo de los indicadores se hacen a través del Observatorio Ambiental de Bogotá, quien cuantifica y grafica los datos e indicadores para medir la calidad del ambiente en Bogotá (ver tabla 2).

Tabla 2. Indicadores vinculados a la industria y producción de materiales.

Indicadores ambientales Bogotá	
Recurso natural	Indicador
Agua	Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano
	Carga contaminante de sólidos suspendidos totales en el sector industrial
Aire	Índice de calidad del aire-ICA
	Monóxido de carbono por 1 hora promedio anual- CO
Fauna	No aplica
	Zonas verdes efectivas per cápita- ZVPH
Suelo	Determinantes ambientales emitidos en instrumentos de gestión del suelo-DAEIGS
	Porcentaje de generación de residuos aprovechables por tipo de material, en el sector público distrital- Piga residuos
	Árboles por habitante-APH
Vegetación	Cobertura arbórea-CAH
	Subíndice de gestión de arbolado urbano-SGAU

### Selección y ciclo de vida de materiales en la construcción

La selección para el análisis se basa en dos criterios fundamentales: la tradición constructiva y la demanda de los materiales que se producen en la ciudad y el país, y que aplican a sistemas constructivos poco eficientes e insostenibles ambientalmente. Siguiendo la clasificación del ICONTEC, la selección se establece así: concreto, hormigón armado, utilizado ampliamente en la estructura portante de las edificaciones y en detalles de fachadas (alfajías y dinteles), cerámicos. Se selecciona el ladrillo, como uno de los materiales más comunes, usado principalmente en fachadas, tanto en viviendas populares como en los grandes edificios que configuran la imagen de la ciudad. Como principal material pétreo se implementa en Bogotá la piedra amarilla de canteras cercanas, declarado material no renovable por su uso indiscriminado en varios edificios (ver tabla 3).

Entre los metales se seleccionó el aluminio, que configura parte de las estructuras y los elementos de soporte de puertas y ventanas. El aluminio es el material que presenta el mayor impacto ambiental; la madera también se encuentra presente en las edificaciones de la ciudad, con menos uso en la actualidad, pero que, en otro tiempo, hizo parte de la estructura portante de las viviendas y de los cerramientos, en particular en puertas y ventanas. El vidrio conforma la mayor parte de los cerramientos de las edificaciones en la ciudad moderna, por lo tanto, su porcentaje de uso en las fachadas de las edificaciones puede estar entre el 50% y el 80%. Y, por último, se seleccionó el pvc, material que hace parte de los sistemas de funcionamiento técnico de los edificios. Se emplea en los sistemas hidráulico, eléctrico y datos. En la actualidad, las aplicaciones del pvc varían, pueden estar presentes en pisos, paneles y cubiertas (ver tabla 3).

**Tabla 3.** Emisión y consumo en la fase de producción.

Emisión y consumo-Fase de producción				
Clasificación	Material	CO <sub>2</sub>	Energía	Agua
		Por tonelada	Por tonelada	Por tonelada
Concreto	Hormigón Armado	1.18 ton.	3.072 kwh	3.500 litros
Cerámicos	Ladrillo	0.24 ton.	763 kwh	77.000 litros
Agregados	Piedra	0.09 ton.	41 kwh	P
	Acero	2.70 ton.	3.078 kwh	150.000 litros
Metales				
	Aluminio	1.95 ton.	15.000 kwh	350.000 litros
Madera	Nativa	NA	138 kwh	P
Vidrios	Vidrio plano	0,04 ton.	8.042 kwh	P
Plásticos	PVC	7.65 ton.	20.076 kwh	P
P= pendiente				

Los edificios consumen el 60% de los materiales extraídos de la tierra. En este sentido, la industria de la construcción y las edificaciones son las principales consumidoras de recursos, energía y materiales (Zabalza, Valero & Aranda-Usón, 2011). Por otro lado, en la Unión Europea se estima que las edificaciones consumen el 40% de la energía total; también son responsables del 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Además, generan aproximadamente el 40% de los residuos producidos por el hombre (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2010).

### Etapas del ciclo de vida de los materiales

Las etapas del ciclo de vida de los materiales se resumen de la siguiente manera (Guinée, 2002):

- **Extracción:** etapa de explotación y extracción de materias primas que genera impactos ambientales en el entorno donde se realice, por lo que se debe dar cumplimiento a la normativa de gestión ambiental y mitigación de riesgos.
- **Producción:** la materia prima se transforma en productos específicos, según el uso y aplicación. Para lograr altos estándares de calidad, las industrias desarrollan procesos técnicos, debidamente reglamentados, que minimizan la emisión de gases y la contaminación de la atmósfera.



- Transporte: es la etapa de movilización. Se da durante todo el ciclo de vida de los materiales. El costo ambiental del transporte tiene que ver con la relación entre el peso de la carga, la distancia del recorrido, el medio de transporte y el tipo de combustible empleado.
- Construcción: se producen impactos en los procesos de montaje de los sistemas constructivos, también se puede producir contaminación por las sustancias químicas utilizadas, por lo que se debe evitar el vertimiento a los cuerpos de agua. Los desechos que produce la construcción se pueden reciclar, con el fin de que genere un menor impacto ambiental.
- Uso y mantenimiento: una buena respuesta arquitectónica, ligada al sistema constructivo y a la elección acertada de materiales, determinan que el uso y mantenimiento de una edificación cumplan criterios de sostenibilidad. Esto implica que los materiales utilizados cumplan las siguientes características: durabilidad, fácil mantenimiento, uso de sustancias libres de tóxicos que puedan afectar la salud y el medio ambiente y, de ser posible, utilizar materiales que, al final de su vida útil, sean reutilizables o reciclables.
- Reciclaje: desde el punto de vista ambiental, es favorable que la edificación contenga materiales recuperables en sí mismos
- Disposición de desechos: el manejo y la gestión adecuada de la disposición final de un material debe ser tenido en cuenta desde el diseño de la edificación. En esta actividad se realizan la clasificación, el traslado y la disposición final de los residuos en obra, que son los materiales que no se pueden reciclar o reutilizar.



## Evaluación de impacto ambiental

La evaluación de impacto ambiental, que se elaboró bajo la metodología de ACV (análisis de ciclo de vida), está avalada por las normas ISO 14000, pactada en la Cumbre Mundial de Río de Janeiro, realizada en 1992. El encuentro mundial, promovido por la ONU (Organización de las Naciones Unidas), fijó las pautas para la gestión del sistema ambiental y los principios sobre medio ambiente y desarrollo sostenible. El análisis de ciclo de vida y los principios y marco general se rigen bajo la norma ISO 14040, la definición del objetivo y alcance bajo la norma ISO 14041, el análisis del inventario bajo la norma ISO 14042.

Los métodos de evaluación ambiental empleados para la investigación y el trabajo de campo se agruparon en el *software* SimaPro, herramienta que fue creada por la consultora holandesa Pré Consultants. SimaPro es un *software* de análisis de ciclo de vida (ACV, siglas en español y LCA, siglas en inglés, Life Cycle Assessment). Hoy en día, esta herramienta es empleada por más de 60 países en el mundo. SimaPro es un *software* profesional para el cálculo de los impactos ambientales asociados a un material, producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida, con aplicación directa en el ecodiseño, la creación de ecoetiquetas, la arquitectura, la agricultura y, en general, para el cálculo de huella de carbono, emisiones, huella hídrica e impactos en la salud humana y en la calidad del ambiente.

SimaPro tiene una base de datos de materiales y procesos muy completa, que incluye bases de datos reconocidas científicamente, entre las cuales se destaca Ecoinvent. Tiene datos de diversos sectores, tales como el de la producción de energía, el transporte, materiales de

construcción, producción de productos químicos, producción de metales, frutas y verduras. También cuenta con la base de datos de la European Life Ciclo Database (ELCD). La base de datos central ELCD contiene datos de inventario de ciclo de vida (ICV), de asociaciones y grupos de investigación a nivel de la Unión Europea (UE), de negocios y otras fuentes de materiales clave: portadores de energía, transporte y gestión de residuos.

Los materiales seleccionados para la investigación corresponden a los que tradicionalmente se utilizan en la construcción de las edificaciones en Bogotá, particularmente los cerámicos, el hormigón, vidrio y metales. En segundo lugar, se evaluaron los plásticos y algunas maderas que, en la actualidad, empiezan a tener relevancia. Los métodos de evaluación seleccionados corresponden a la categoría de variables, que calcula el impacto generado por los materiales de construcción en la calidad de los ecosistemas y en la salud humana. Los componentes de las materias primas de los materiales pueden ser tóxicos, así como los productos que, en su proceso de fabricación, alteran el bienestar humano y el impacto generado en el uso de recursos no renovables.

### Metodologías de evaluación de los materiales de estudio

Eco-indicador 99(H): (la información sobre esta norma fue publicada por Pré Consultants-SimaPro) es un método orientado a la evaluación de los daños durante todas las fases del análisis de ciclo de vida. Los datos correspondientes a las categorías de impacto Eco Indicador 99 están recogidas y publicadas, en una hoja de cálculo, por el Instituto de Ciencias Ambientales de la

Universidad de Leiden, Países Bajos. Las categorías y variables de análisis son: 11 variables agrupadas en 3 categorías. La primera categoría es la salud humana, y sus variables son: partículas cancerígenas, orgánicos respirados (sustancias orgánicas inhaladas) e inorgánicos respirados (sustancias inorgánicas inhaladas). La segunda categoría corresponde al análisis de la calidad del ecosistema, y sus variables son: cambio climático, radiación, capa de ozono y ecotoxicidad (en agua dulce y tierra). La tercera categoría compete a los recursos en las siguientes variables: acidificación y eutrofización, uso de la tierra, minerales y combustibles fósiles. La categoría de daños normalizados depende de los factores de ponderación para la calidad de los ecosistemas, recursos y la salud humana. Este método se utilizó para evaluar los metales, donde se evidencia el mayor impacto en los recursos y los minerales utilizados para los procesos de fabricación (ver ficha técnica metales).

EDIP 2003: método de evaluación de impacto ambiental. La metodología EDIP 2003 analiza 18 categorías de impacto: capa de ozono, acidificación, eutrofización terrestre, eutrofización acuática (N-eq), eutrofización acuática (P-eq), formación de ozono (humana) extendido con factores adicionales de la IE 2.0, formación de ozono (vegetación) extendido con factores adicionales de la IE 2.0, toxicidad humana (vía de exposición a través del aire), toxicidad humana (vía de exposición a través del agua), toxicidad humana (vía de exposición a través del suelo), ecotoxicidad (aguda agua), ecotoxicidad (crónica de agua), ecotoxicidad (crónica del suelo), recursos y residuos.

Es el método de evaluación más completo, en cuanto analiza aspectos fundamentales para determinar el impacto en todas las fases del ciclo de vida de los materiales de construcción. El método se implementó para evaluar los siguientes materiales: concretos, maderas y vidrio.

Ecological Scarcity 2013: método de escasez ecológica. El método contiene 19 categorías de impacto específico, con respecto a cada sustancia un UBP (puntos de carga del medio ambiente); el puntaje final como factor de caracterización. Debido a que todas las categorías de impacto se expresan en la misma unidad UBP, se añadió una etapa de ponderación para sumar las puntuaciones. Las categorías de impacto son: recursos hídricos, recursos energéticos, recursos minerales, uso del suelo, calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, principales contaminantes del aire y PM, sustancias cancerígenas en el aire, metales pesados en el aire, contaminantes del agua, metales pesados en el agua, pesticidas en el suelo, metales pesados en los suelos, sustancias radiactivas en el aire, sustancias radiactivas en el agua, residuos no radiactivos y residuos radiactivos. Esta metodología se empleó para evaluar los siguientes materiales: plásticos, piedras y cerámicos.

### Hacia la resiliencia y eficiencia de materiales para la arquitectura

El impacto ambiental en el sector de la construcción se agrupa en tres aspectos:

- El consumo de recursos
- La reducción de las emisiones CO<sub>2</sub>
- La gestión de los residuos del proceso constructivo

Es importante anotar que, en el caso de los residuos, deben ser estimados como un bien, es decir, aprovecharlos mediante el reciclaje e incorporarlos de nuevo en el proceso de producción de edificios, imitando de cierta forma a los ciclos de la naturaleza.

### Materiales resilientes

Muchos materiales, aplicados a obras civiles, están sometidos a fuerzas o cargas, por eso es necesario conocer las características de los materiales. En general, el comportamiento mecánico de un material refleja la relación que existe entre la fuerza aplicada y la respuesta del mismo, es decir, evaluamos el comportamiento mecánico en términos de deformación. La mayoría de las estructuras se diseñan de tal manera que solo ocurra deformación elástica, lo que se traduce en evitar la rotura del mismo; además, es deseable conocer el nivel de tensiones con el cual empieza la deformación plástica.

Antes de definir el concepto de resiliencia en los materiales, es conveniente recordar la curva esfuerzo-deformación en un ensayo de tracción, tal como se observa en la figura 1. En el ensayo de resistencia a la tracción se mide la deformación, es decir, el alargamiento de la probeta, entre dos puntos fijos de la misma, a medida que se incrementa la carga aplicada. La deformación se representa gráficamente en función del esfuerzo, es decir, de la carga aplicada dividida por la sección de la probeta se obtiene, en general, una curva de esfuerzo-deformación. Dicha curva tiene dos zonas, desde las cuales se observa el comportamiento elástico y plástico del material y, a su vez, muestran cuatro estados bien diferenciados, como se muestra en la figura 1.

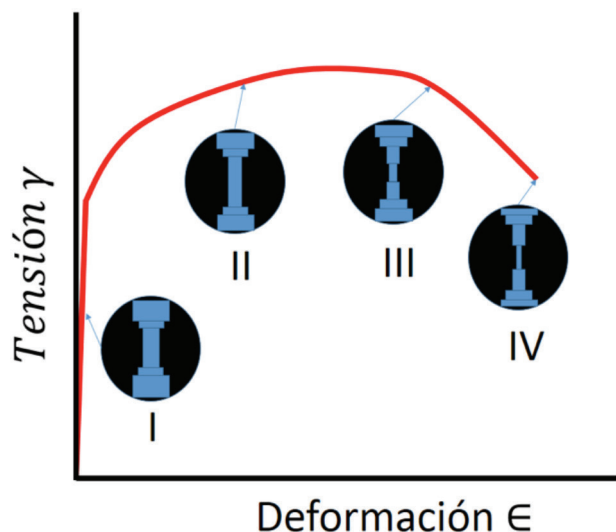


Figura 1. Curva teórica de tensión deformación de un material.  
Fuente: adaptación propia a partir de Callister.

#### I) El primer estado representa la deformación elástica

Las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial. En donde la deformación es proporcional a la tensión aplicada, podemos introducir el término módulo de elasticidad, el cual puede ser interpretado como la rigidez o resistencia de un material a ser deformado elásticamente: cuanto mayor es el módulo elástico, más rígido es el material y menor es la deformación elástica que se origina cuando se aplica una tensión. El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión y la deformación se denomina módulo de elasticidad o módulo de Young ( $E$ ), y se mide en pascales, en el sistema internacional de unidades. El módulo de Young es característico del material.

La tensión más elevada que se alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno. Pueden existir dos zonas de deformación elástica: la primera recta y la segunda curva, siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas.

#### II) El segundo estado pertenece a la fluencia

Es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición del material entre la deformación elástica y la plástica no se aprecia de forma clara.

#### III) El tercer estado pertenece a la zona de deformación plástica

Si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera solo parcialmente su forma, quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica.

#### IV) El cuarto estado es la estricción

Llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta, apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose, hasta la rotura de la probeta en esa zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación. Realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura.

En general, los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la

probeta de forma brusca. Otras características referentes al comportamiento mecánico de los materiales, que pueden caracterizarse mediante el ensayo de tracción, son la resiliencia y la tenacidad.

La tenacidad es la energía total absorbida, que viene representada por el área comprendida bajo la curva tensión-deformación, hasta llegar a la rotura. La resiliencia es la capacidad de un material de absorber energía elástica cuando es deformado y de ceder esta energía cuando se deja de aplicar. La propiedad asociada a la resiliencia se denomina módulo de resiliencia, el cual se representa como  $U_r$ .

El módulo de resiliencia es la energía de deformación, por unidad de volumen, que se requiere para deformar un material hasta el límite elástico. El límite elástico es justo donde el material pasa de ser elástico a plástico. Se representa como  $\sigma_y$ .

Desde el punto de vista matemático, el módulo de resiliencia de una probeta, sometida a una carga uniaxial uniforme, es justamente el área debajo de la curva tensión-deformación hasta la fluencia, tal como se muestra en la ecuación:

$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma(\epsilon) d\epsilon$$

El módulo de resiliencia en una probeta de material elástico lineal, sometida a tensión axial uniforme, se puede escribir de la siguiente forma:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon$$

Donde  $\sigma_y$  es la tensión de fluencia o límite elástico y  $\epsilon$  es la deformación correspondiente a dicho límite elástico. En términos de la energía absorbida en el impacto, en relación con el módulo de elasticidad del material, se puede escribir como:

$$U_r = \frac{\sigma_y^2}{E}$$

Donde  $E$  es el módulo de elasticidad del material. A partir de la ecuación anterior, podemos concluir que los materiales resilientes tienen un límite elástico muy alto y un módulo de elasticidad muy bajo. Los materiales que cumplan esta condición son muy resilientes. Las unidades de resiliencia son el producto de las unidades de los ejes del producto del diagrama tensión-deformación. En unidades del sistema anglosajón es pulgadas libra fuerza dividido por pulgada cúbica, lo que equivale a psi, mientras que el Sistema Internacional de Unidades se expresa en julios por metro cuadrado, lo que equivale a Pa.

Existe una relación entre resiliencia y tenacidad, que es generalmente monótona creciente, es decir, cuando un material presenta más resiliencia que otro generalmente presenta mayor tenacidad, pero dicha relación no es lineal. En definitiva, es la capacidad de memoria de un material para recuperarse de una deformación, producto de un esfuerzo externo. El ensayo de resiliencia se realiza mediante el Péndulo de Charpy, también llamado prueba Charpy. En un ensayo con el Péndulo de Charpy se puede calcular la resiliencia conociendo la diferencia entre la altura inicial de caída del péndulo y la altura que alcanza el péndulo posteriormente al impacto.

Un elevado grado de resiliencia es característico en los aceros austeníticos, aceros con alto contenido de austenita. En aceros al carbono, los aceros suaves (con menor contenido porcentual de carbono) tienen una mayor resiliencia que los aceros duros. Entre los materiales conocidos más resilientes se encuentran la seda de araña, el tendón, etc. El cable de acero presenta una resiliencia elevada. El módulo de resiliencia es una propiedad fundamental en pavimentos asfálticos sometidos a las cargas del tráfico. Un ejemplo de la resiliencia de algunos metales se muestra en la tabla 4.

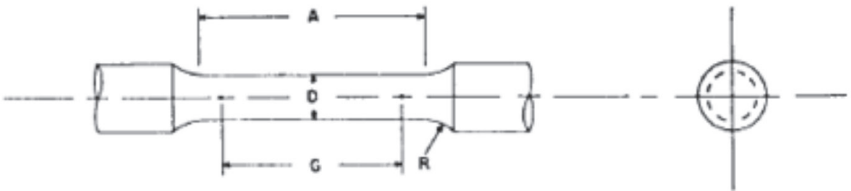
Tabla 4. Resiliencia de materiales.

Material	Límite elástico (Mpa)	Módulo de Young (Gpa)	Ur(J/m2)
Acero	830	207	16,6 X105
Latón	380	97	7,44 X105
Aluminio	275	69	5,48 X105
Titanio	690	107	22,2X105

## Métodos de ensayo para cuantificar las propiedades mecánicas

Para cuantificar las propiedades mecánicas de tracción se hace uso del método de ensayo estandarizado bajo la ASTM E8 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials), con la infraestructura del Centro de Materiales y Ensayos del SENA, seccional Bogotá. Este ensayo se hace con el fin de calcular la resistencia mecánica. Aunque para medir la resiliencia del material se puede hacer una aproximación de la resiliencia según la ecuación 1, mencionada anteriormente. De acuerdo a la figura 1, se realiza la extracción de la muestra de acuerdo al plano mecánico establecido y se extrae la muestra de la figura 2.

Este proceso se llevó a cabo en una máquina de CNC, para asegurar la uniformidad de las dimensiones y, de igual manera, el acabado superficial.



	Dimensions, mm				
	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional To Standard			
	12.5	9	6	4	2.5
G—Gage length	62.5 ± 0.1	45.0 ± 0.1	30.0 ± 0.1	20.0 ± 0.1	12.5 ± 0.1
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2	9.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	4.0 ± 0.1	2.5 ± 0.1
R—Radius of fillet, min	10	8	6	4	2
A—Length of reduced section, min (Note 2)	75	54	36	24	20

Figura 2. Probeta normalizada bajo ASTM E8.



Una vez mecanizada la probeta (ver figura 3), se procede a hacer uso de las máquinas y herramientas de medición para ejecutar el ensayo.

En primer lugar, se hace uso de una máquina universal de ensayos, de marca SHIMADZU UH-50, de aplicación de carga de tipo hidráulica. Esta máquina cuenta con una capacidad de 50 toneladas fuerza. Se compone principalmente de dos partes: un marco de carga, que se visualiza en la figura 4, al lado izquierdo, y un sistema de mando digital, que visualiza la carga de manera analógica y digital, al lado derecho de la figura 5.

En de vista que el objetivo del ensayo es medir tanto fuerza como deformaciones, principalmente en la zona elástica, se hace uso de un sistema de medición llamado extensómetro. Esta herramienta permite medir deformaciones que van del orden de micras hasta milímetros. El dispositivo se muestra en la figura 6.



**Figura 3.** Probeta mecanizada de sección reducida bajo las condiciones de ASTM E8.



**Figura 4.** Ampliación de la sección reducida.



**Figura 5.** Máquina universal de ensayos del Centro de Materiales y Ensayos del SENA, seccional Bogotá.



**Figura 6.** Extensómetro.

Debido a que el extensómetro mide pequeñas deformaciones, se debe hacer una verificación de manera gradual, comprobando el funcionamiento del mismo con una unidad de verificación, que es en sí un micrómetro (ver figura 7).



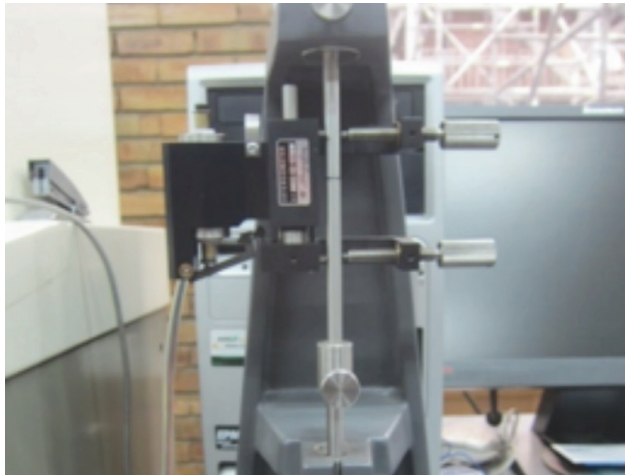


Figura 7. Extensómetro puesto en la unidad de verificación.

El extensómetro tiene como objetivo principal medir la deformación elástica, que en este caso, por ser un material dúctil, presentará una deformación alrededor de 0,25 mm. Este valor sirve para poder llevarlo a términos de porcentaje y desplazar la curva a un offset de 0,2%, donde la curva paralela que corta con la gráfica representará el esfuerzo de fluencia (ver figura 8).

El objetivo principal del ensayo de tracción es medir esfuerzos tanto elásticos como plásticos, donde un esfuerzo es la división de la fuerza dividido la unidad de área inicial, es a esto lo que llamamos esfuerzo ingenieril, y es de allí que este valor es comparable con las diversas normas existentes en cuanto a propiedades mecánicas. Por ello es importante utilizar elementos como el calibrador pie de rey (ver figura 9).

Se realiza la medición del diámetro de la sección reducida de la muestra (ver figura 10). Luego se inserta el valor en el *software* y se resetean todos los ceros, para dar inicio al proceso de montaje de la muestra.

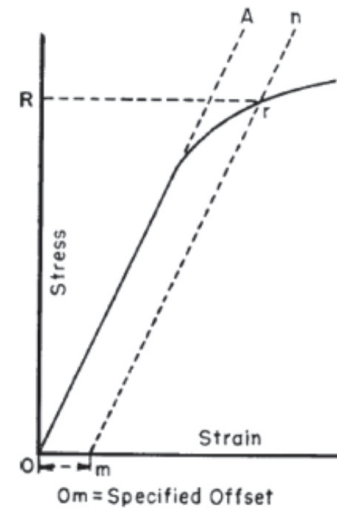


Figura 8. Método *offset* para cálculo del esfuerzo de fluencia.



Figura 9. Calibrador pie de rey.



Figura 10. Medición de la muestra.

Cuando los ceros están reseteados (ver figura 11), se realiza el montaje de la muestra en el marco de carga y, de igual manera, se coloca el extensómetro sobre la muestra (ver figura 12).

Una vez se realizan las conexiones del extensómetro con la muestra metálica, se procede a realizar el ensayo. En primera instancia, se realizará la medición de la zona elástica, dado que tiene el extensómetro. Luego, el *software* demanda el retiro del extensómetro (ver figura 13) y, de esta manera, pasará a la zona plástica, realizando de igual manera la obtención de datos en tiempo real.

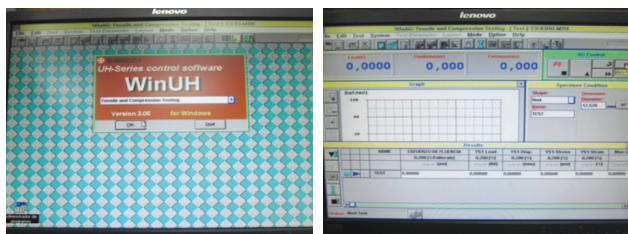


Figura 11. Imagen de la interfaz de la máquina universal, dispuesta para el proceso de medición.

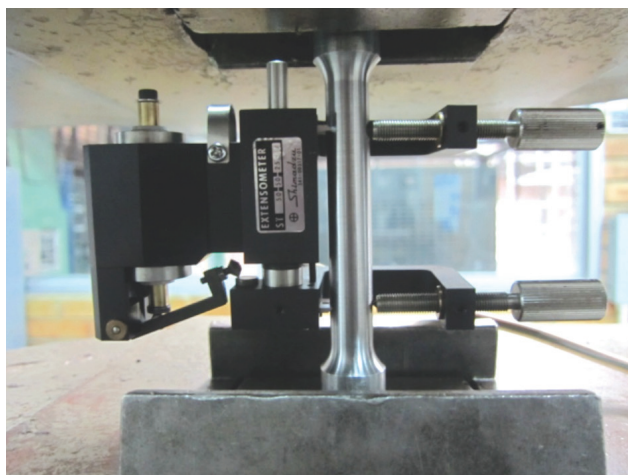


Figura 12. Extensómetro sobre la muestra dispuesta sobre el marco de carga.

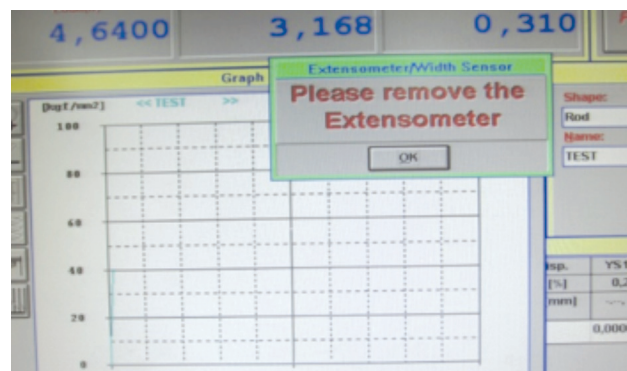


Figura 13. Software WinUH una vez ha concluido la zona elástica.

Durante el proceso siguiente, la máquina continuará realizando la aplicación de carga y los sensores obtendrán más información, para poder obtener las curvas y datos necesarios. En la figura 14 se observa cómo, a medida que la máquina realiza la aplicación de carga, la probeta aumenta su deformación, hasta crear la estricción en su área.

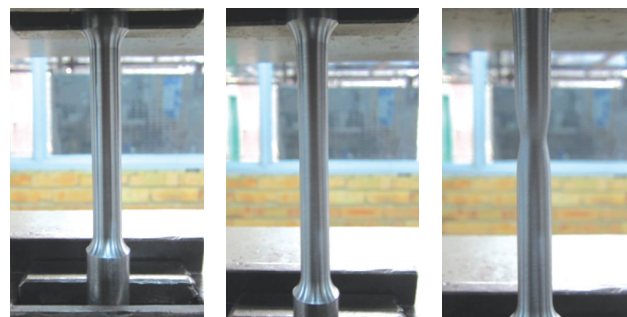


Figura 14. Proceso de deformación de la muestra metálica.

Cuando el ensayo concluye, es decir, cuando la muestra llega al estado de rotura, es medida en su diámetro final y, de igual manera, en su longitud, para poder obtener los valores de reducción de área y porcentaje de elongación (ver figura 15).

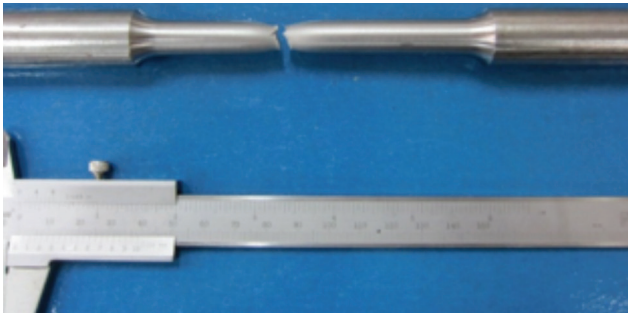


Figura 15. Probeta con sección de fractura, ensayo ya finalizado.

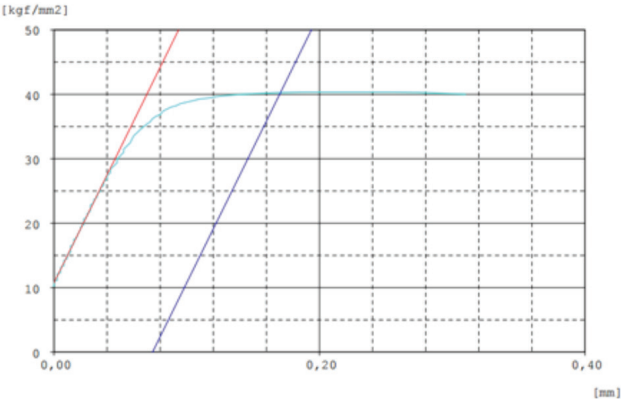


Figura 16. Curva esfuerzo y deformación de la zona elástica, con un offset del 0,2%.

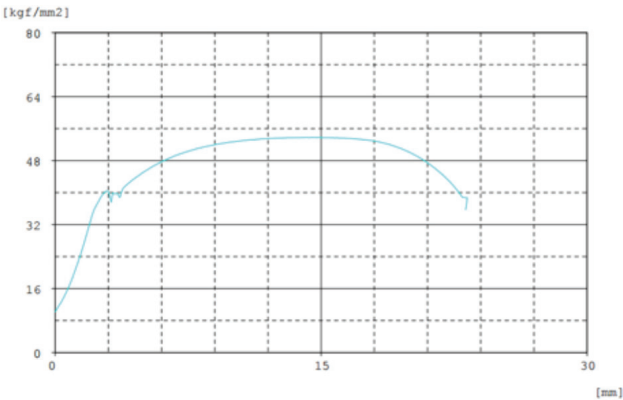


Figura 17. Curva esfuerzo vs deformación.

Cuando todos los datos están calculados, se procede a obtener las curvas de esfuerzo y deformación de la zona elástica, con un offset de 0,2% (curva azul) para calcular el esfuerzo de fluencia (ver figura 16), así como la curva esfuerzo vs deformación (ver figura 17).

Para el acero usado como método de ensayo, un acero estructural de bajo carbono ha arrojado los siguientes datos (ver figura 18):

Calc.	ESFUERZO DE INFLUENCIA	YS1-Load	YS1-Disp.	YS1-Stress	YS1-Strain
CP1, CP2	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
CP Unit	[%/Fullscale]	[%]	[%]	[%]	[%]
Pass-Fail	---, ---	---, ---	---, ---	---, ---	---, ---
Unit	[psi]	[ibf]	[mm]	[psi]	[%]
TEST	---, ---	10944, 4	0,18750	57354, 0	0,37500
Calc.		ESFUERZO MÁXIMO	Break-Load	ESFUERZO DE ROTURA	Reduction of Area
CP1, CP2					
CP Unit					
Pass-Fail	---, ---	---, ---	---, ---	---, ---	---, ---
Unit	[ibf]	[psi]	[ibf]	[psi]	[%]
TEST	14603, 6	76529, 7	10503, 6	55043, 6	56, 7893
Calc.	Elastic	Fitted Back			
CP1, CP2	13,000, 18,000				
CP Unit	[kgf/mm2]				
Pass-Fail	---, ---	---, ---			
Unit	[psi]	[%]			
TEST	2972205	34, 0000			

Figura 18. Cálculos obtenidos del acero ASTM A36.

## Cálculo de la resiliencia a partir de la curva esfuerzo vs deformación

Con los datos del ensayo de tracción se puede obtener una gráfica de fuerza en Newton y la deformación en m (ver figura 19). Con esto podemos obtener el área bajo la curva de la zona elástica y, con este valor, obtener la resiliencia realizando la integral con la ecuación 1, mencionada anteriormente. Para este acero se ha obtenido un valor de 16.00 J (ver figura 19).

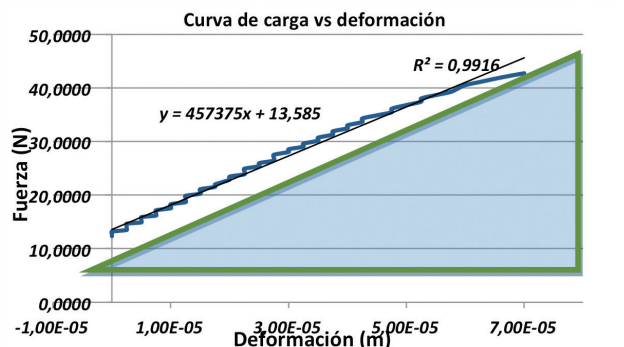


Figura 19. Curva de carga vs deformación.

## Ensayo Charpy

Se presentan los datos obtenidos de absorción de energía de un Acero ASTM A 36, a diferentes temperaturas, durante el ensayo de impacto ejecutado según la norma ASTM E23. Se realizaron 18 ensayos, a 6 temperaturas diferentes, con el fin de determinar la tenacidad y la temperatura de transición dúctil-frágil (BDTT, por sus siglas en inglés) del material. La tenacidad se puede determinar inmediatamente, en el momento del ensayo, luego de realizar un tratamiento estadístico de los resultados a temperaturas específicas; en cambio, la temperatura de

transición dúctil-frágil requiere la energía de absorción a varias temperaturas. Posteriormente, se procede a tabular y a graficar los datos para determinar la BDTT.

Para el ensayo de impacto se consideran dos procedimientos: el ensayo Izod, empleado generalmente para materiales no metálicos, y el ensayo Charpy, el empleado en esta ocasión.

La máquina empleada, de origen alemán y hecha en 1973, posee una masa de 18.75 kg, una longitud del brazo de 825mm, una inclinación inicial de 18° respecto a la vertical, una resolución de 0.1 Kg, un error por pérdidas de 0.19 Kg y una capacidad máxima de medición de 30 Kg (ver figura 20).



Figura 20. Péndulo de impacto Charpy. Laboratorio de ensayos mecánicos, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Se realizaron ensayos a temperaturas diferentes. Para alcanzar estas temperaturas, se utilizaron diferentes medios de enfriamiento o calentamiento controlado por una termocupla Fluke S1 K/J thermometer tipo K.



Para alcanzar temperaturas por debajo de la temperatura ambiente, se utilizó nitrógeno líquido puro, en solución con metanol; para temperaturas por encima del ambiente, se utilizó una estufa y un recipiente con agua (ver figura 21).



Figura 21. Dispositivo para el enfriamiento con nitrógeno líquido y calentamiento en agua de las probetas en Acero ASTM A 36.

Lograda la temperatura para cada serie de muestras, se ejecutó el ensayo de Charpy, obteniéndose los datos de la tabla 5.

Obtenidos los datos, se grafican, y de esta manera se puede determinar la transición dúctil-frágil. Se observa que, a medida que se modifica la temperatura del material, la energía absorbida en el impacto tiene una variación significativa en ciertos intervalos de temperatura; en otros intervalos podemos observar una variación estable.

Para temperaturas menores a  $-50^{\circ}\text{C}$ , la energía absorbida tiene una tendencia constante, con una magnitud

Tabla 5. Resultados del ensayo Charpy.

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Energía absorbida (Kgm)		Medio de enfriamiento o calentamiento
	Ensayos	Promedio	
-200	0,56	0,50	Nitrógeno líquido
	0,47		
	0,46		
-44	0,6	0,63	Solución de nitrógeno líquido y metanol
	0,54		
	0,76		
18,6	1,84	2,06	Temperatura ambiente
	2,5		
	1,85		
29	1,99	2,07	Agua
	2,17		
	2,05		
60	5,14	4,54	Agua
	3,72		
	4,77		
90	10,24	9,12	Agua
	9,63		
	7,5		

relativamente baja, lo que nos correlaciona un comportamiento frágil del material en dicho intervalo. A medida que la temperatura aumenta, desde  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ , la energía absorbida aumenta con la misma, y por encima de  $50^{\circ}\text{C}$  exhibe una variación mayor en la energía de impacto, lo que nos indicaría un probable intervalo, en donde el material experimentaría su transición dúctil-frágil. A temperaturas más elevadas, la energía de absorción alcanza su valor máximo, estabilizándose en un rango de temperatura superior, relacionando de esta manera un comportamiento dúctil del material.

De acuerdo a la gráfica obtenida para este Acero ASTM A36, existe un intervalo en el cual ocurre la transición dúctil-frágil, pero es difícil establecer con certeza el valor

de la temperatura para dicha transición. Debido a las diferentes variables involucradas en el proceso, y a algunos factores de error relacionados con la práctica, es conveniente definir un intervalo que contenga dicha temperatura. En este caso, podemos observar que dicho intervalo sería entre 60°C y 67°C.

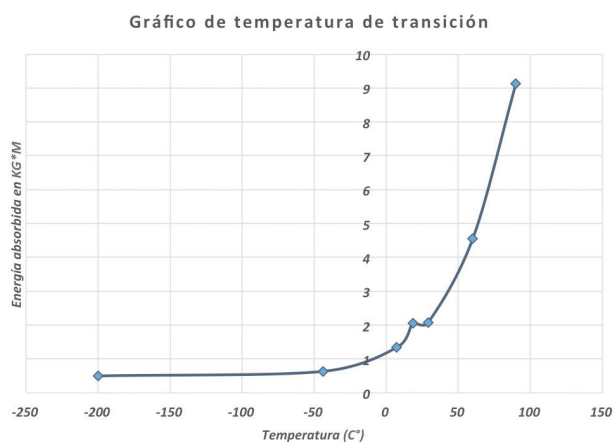


Figura 22. Gráfico de temperatura de transición.  
Curva de energía absorbida en función de la temperatura.

## Análisis de la superficie de fractura en función de la temperatura

Al observar la superficie de fractura mostrada en las figuras 23 y 24, después de realizado el ensayo Charpy, se pueden distinguir con facilidad dos superficies de coloración distinta, una en los bordes, de color gris oscuro y medianamente regular, y otra gris brillante, en el interior de la probeta.

El color gris oscuro en los bordes es indicativo de la energía absorbida en el impacto, cuanto mayor sea esta zona mayor será la resiliencia obtenida por el material.

Así, cuanto mayor sea la relación de áreas mayor será la resiliencia de un material respecto a otro. Alta Sgris/Sbrillante> Resiliencia, que, según los ensayos realizados a temperatura ambiente, está alrededor de 16.00 J, similar al análisis realizado utilizando el cálculo de la integral del área bajo la curva en la zona elástica, que da lugar a la resiliencia.

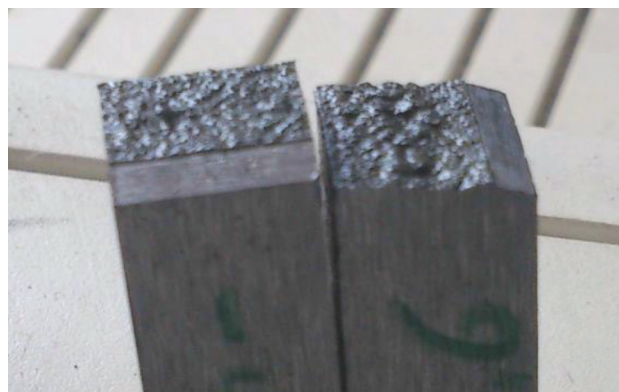


Figura 23. Superficie de fractura ASTM A36 a -44°C.



Figura 24. Superficie de fractura ASTM A36 a 90°C.

En la figura 24, la energía absorbida de impacto fue relativamente baja, la superficie de fractura muestra una textura granular, rugosa, indicando que se produjo una fractura frágil del material a dicha temperatura. En la figura 25, se observa que en la zona de fractura hay cierta evidencia de deformación plástica, la grieta no se propaga en una sola dirección o en un plano, lo que se asocia a un obstáculo en el avance de la grieta, requiriendo mayor energía para la propagación de la grieta, por lo tanto, la energía absorbida de impacto es mayor. En la figura 25, la superficie de fractura tiene una combinación de rasgos fibrosos y granulares, característicos de fractura mixta (dúctil-frágil), ya que a dicha temperatura se encuentra en el intervalo de transición dúctil-frágil.

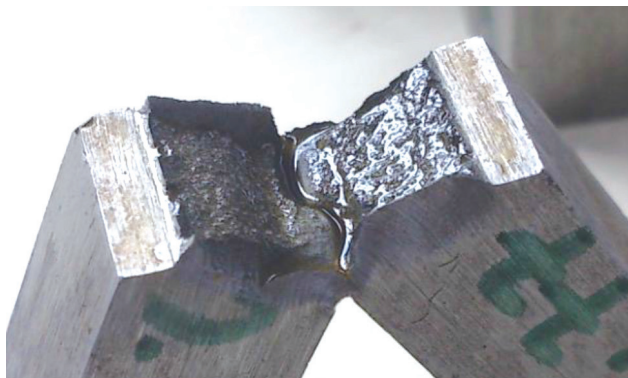


Figura 25. Superficie de fractura ASTM A36 a 60°C.



## Resiliencia: una estrategia de adaptación para enfrentar el cambio climático en Bogotá

Podemos concluir que el cambio climático afecta a los materiales de los edificios, ya que los hace más vulnerables a las condiciones climáticas adversas (Costa & Mora, 2010). Por ejemplo, el 75% de los colombianos vive en ciudades (Samad *et ál.*, 2015) que no están preparadas para responder a las nuevas condiciones extremas que está produciendo el cambio climático. Como resultado de ello, los nuevos y viejos edificios construidos en las ciudades colombianas no están en condiciones de resistir los cambios producidos por este fenómeno. En este contexto, el factor de habitabilidad se convierte en un elemento importante en el proceso de diseño de una edificación (Edwards, 2005).

Por ejemplo, en Bogotá (Colombia), el 70% de los edificios son residenciales (Escallón & Villate, 2013). Solo el 40% de estos edificios son de buena calidad (Escallón & Rodríguez, 2010). Por tanto, el crecimiento de la población de Bogotá crea una mayor demanda de recursos y energía, que impacta la capacidad de respuesta de la ciudad. Así, el cambio climático afecta la habitabilidad de los edificios de la ciudad, ya que hace que estos sean menos seguros a cualquier cambio climático extremo. Adicional a este problema, un gran número de nuevas edificaciones en Bogotá son de mala calidad, aumentando el problema (Ramírez, 2002).

Por estas razones, Bogotá necesita un cambio en la calidad de vida de sus ciudadanos y en las condiciones de sus edificaciones. En este sentido, se deben tomar medidas para dar respuestas adecuadas a los riesgos de desastre producidos por el cambio climático. Por lo tanto, es necesario proponer estrategias de diseño que permitan que los edificios sean sostenibles a largo plazo. Es decir,



las soluciones deben estar dirigidas hacia el diseño de ciudades y edificaciones resilientes que proporcionen una salida adecuada a estos fenómenos (UNISDR, 2012; ONU-UNHABITAT, 2014). Para finalizar, se propone un modelo de gestión de medio ambiente más flexible, que evalúa el factor de habitabilidad de los edificios. Este modelo puede dar algunas pautas para el diseño de edificios resilientes.

### El concepto de habitabilidad

El cambio climático es una realidad. El clima extremo afecta la habitabilidad de las ciudades y de los propios edificios. Podemos observar esto hoy, por ejemplo, en la ciudad de Bogotá, donde la lluvia impredecible y los vientos extremos suelen causar daños en los edificios. Por esa razón, es necesario incluir, dentro de las estrategias de diseño de la habitabilidad, el concepto de resiliencia, que es la capacidad de un sistema para resistir diversos trastornos sin que se afecte la estructura original.

En resumen, las dimensiones económicas, ambientales y sociales deben ser consideradas en conjunto para evaluar plenamente la sostenibilidad (Sikdar, 2003). Por ejemplo, en Bogotá en los últimos años el gobierno tuvo que implementar ciertas normas para cambiar el enfoque de la construcción. El nuevo Código de Construcción de Bogotá dio diferentes soluciones para la habitabilidad y la baja calidad de las edificaciones. Una de estas recomendaciones fue poner al día las leyes de construcción de edificaciones sostenibles para la ciudad. Como resultado, el alcalde actual ha integrado el tema de la resiliencia en las políticas de Bogotá.

Hoy más que nunca, la flexibilidad orientada a la resiliencia es una condición necesaria para el concepto de habitabilidad, ya que la construcción de nuevos edificios solo se puede lograr con éxito a través del cambio y la transformación. Entonces, es esencial incluir esta variable en el proceso de diseño sostenible. Inevitablemente, hoy la mayoría de los edificios construidos en la ciudad utiliza normas de construcción deficientes, lo que significa que se produce una menor calidad en los espacios interiores y exteriores de las edificaciones.

### Flexibilidad

La flexibilidad es una variable de la regulación del medio ambiente humano, porque es el factor que hace posible el cambio. Además, al ser una necesidad, la flexibilidad impide el colapso de un entorno. Al respecto, se retomaron cinco factores de flexibilidad de investigaciones anteriores: la identidad, la apropiación, la necesidad, densificación y la renovación (Cubillos, 2006). Para resumir, la variable de flexibilidad es un problema de diseño sostenible. Por ejemplo, el profesor Mahdavi (1998) explica:

El programa de flexibilidad sugiere que dada las variaciones de los ocupantes potenciando la dimensión ecológica, la habitabilidad de los edificios no debe estar vinculada con el cumplimiento de cualquier conjunto rígido de criterios de rendimiento. Más bien, la idea es medir la habitabilidad en términos de capacidad de los edificios para dar cabida a una amplia gama espacial y temporal de expectativas ambientales variables (p. 26).

En resumen, si la flexibilidad es una condición necesaria para el diseño de edificios en Bogotá, se debe valorar como una variable en la evaluación del impacto de habitabilidad y su capacidad de resiliencia en los edificios en un entorno determinado.

### Los patrones sociales

En nuestro medio, los patrones sociales son una prueba de la capacidad de las personas para adaptarse a los diferentes contextos. Las personas interactúan con su entorno reconociendo los tipos de edificios que responden a su propio proceso de adaptación. Por lo tanto, la flexibilidad y los patrones sociales se identifican como elementos inter-relacionados con el reconocimiento de la necesidad de flexibilidad en las edificaciones (Cubillos, 2010).

Para ilustrar esto, se requiere un proceso de toma de decisiones en la organización de las diferentes estructuras sociales, de acuerdo con el ambiente determinado. Es decir, una jerarquía de control que consiste en patrones sociales, los cuales constituyen una analogía biológica. A esta situación se le puede llamar patrones de control (Cubillos, 2010). Por ejemplo, al respecto se dice:

Desde el siglo 20 hasta hoy, los cambios humanos importantes pueden ser detectados en la organización social y los estilos de vida, especialmente en relación con las condiciones de privacidad de sus miembros. Por un lado, el espacio doméstico se ha desarrollado como consecuencia de un aumento en las condiciones materiales relacionadas con una mayor disponibilidad de espacio, los flujos de materiales y equipos para cada individuo (Casals-Tres, Arcas-Abella, Cuchí & Altés-Arlandis, 2009, p. 411).

En síntesis, el reconocimiento de patrones sociales es una herramienta que se utiliza para identificar las variables de habitabilidad. Los patrones sociales permiten la evaluación del impacto social de los edificios y su capacidad de resiliencia.

### Modelo de habitabilidad

A continuación, se presenta el modelo de habitabilidad propuesto. En este sentido, es importante explicar que hay entornos que responden a las variaciones climáticas a través de un adecuado manejo de las condiciones resilientes del ambiente. Para lograr esto, se toman en cuenta tres elementos: el hombre, los procesos constructivos y el hábitat, a fin de proporcionar edificaciones sostenibles que se mantengan en la ciudad a largo plazo.

#### Calidad de los edificios

Hoy en día, es común que los edificios sean diseñados de forma inadecuada y causen el síndrome del edificio enfermo (SBS) para los usuarios. Este síndrome es ocasionado por una mala selección de materiales, un bajo control en los desagües y la contaminación del aire. Por ello es importante, para el estudio del concepto de habitabilidad, el factor de habitabilidad, pues identifica otras variables. Por ejemplo, variables físicas tales como la comodidad, la salud, la satisfacción, etc. Esta definición fue propuesta por primera vez por la Organización Mundial de la Salud, en 1982, y ha sido estudiada desde entonces en diversos campos disciplinares, como por ejemplo en la medicina y la arquitectura.

Todas estas variables están directamente relacionadas con el proceso de diseño. La calidad del entorno construido

tiene implicaciones importantes para la salud de las personas (Mahdavi, 1998). Es por esta razón que la primera función de la arquitectura es la de proveer condiciones espaciales adecuadas (Casals-Tres *et ál.*, 2009). Por lo tanto, la calidad de los edificios es un elemento importante en la evaluación de las condiciones de habitabilidad.

### Calidad de vida

La calidad de vida es la organización social que proporciona la satisfacción de las necesidades básicas de la mayoría de los individuos que la componen, en un proceso continuo en el tiempo, basado en la capacidad de obtener recursos del medio ambiente (Casals-Tres *et ál.*, 2009). Es importante entonces estudiar el concepto de calidad de vida, pues es una variable en el proceso de diseño.

El factor de habitabilidad tiene tres agentes que afectan la calidad de vida: el crecimiento demográfico, el cambio climático y el impacto ambiental. Además, estos agentes tienen un atributo importante: la capacidad de recuperación. Este factor de habitabilidad tiene la habilidad para resistir los cambios sin afectar significativamente el medio ambiente y la estructura de los edificios. Por lo tanto,

el estudio de la habitabilidad de los edificios es necesario, ya que pondrá a prueba los impactos generados por los agentes y determinará el grado de resistencia que los edificios deben tener para ser sostenibles en el tiempo.

En Bogotá, la industria de la construcción necesita herramientas de diseño para crear estrategias que conduzcan a la producción de edificios sostenibles y una ciudad en términos de resiliencia, pues esto mejoraría la calidad de vida de los usuarios. Por lo tanto, se necesita una propuesta de ensayos de habitabilidad para el diseño de edificios sostenibles. Un modelo teórico se propuso para las pruebas de habitabilidad para edificios. Este modelo combina diferentes variables, como las descritas arriba y otras variables de prueba de múltiples dimensiones.

La figura 26 muestra el modelo del factor de habitabilidad en los edificios. Este gráfico consiste en cuatro principales variables independientes de color azul: la calidad del edificio, la flexibilidad, la calidad de vida y los patrones sociales. A continuación, se pueden ver cinco variables: alto nivel tecnológico, medio ambiente, ahorro de energía, uso eficiente de los recursos y los nuevos materiales.

### Habitabilidad

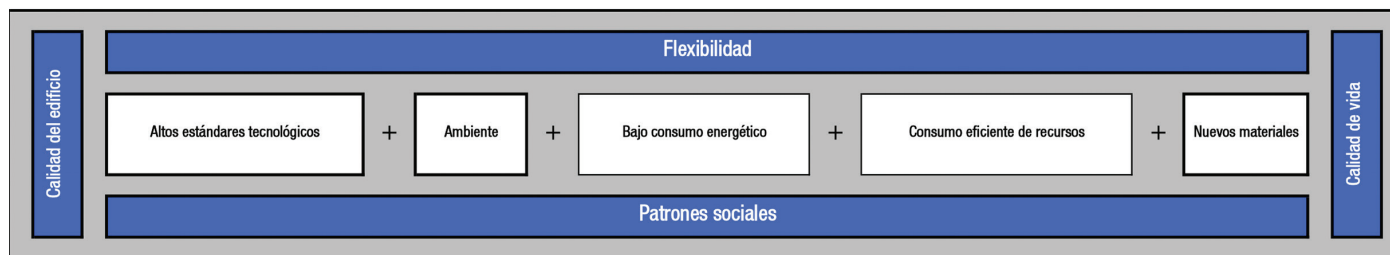


Figura 26. Modelo de habitabilidad.  
Fuente: Cubillos y Rodríguez, 2013, p. 59.

Este modelo ha atravesado diferentes elementos, necesarios para la habitabilidad de los edificios, tales como la densificación, el cambio climático, la zona de la comodidad y el bienestar de los ciudadanos. Además, la intersección de estos elementos permite cuantificar el grado de ocupación de un edificio. Esta cuantificación podría permitir la posibilidad de identificar el grado de resistencia del edificio.

### Modelo de administración de ambientes resilientes

---

Con el fin de abordar este problema, se deben diseñar edificios resilientes. Este tipo de edificaciones pueden ser resistentes al cambio climático y responden automáticamente a las variaciones del entorno, para garantizar sostenibilidad a largo plazo. La mejor manera de que los edificios resilientes respondan al cambio climático es a través de la tecnología y del planteamiento de principios de sostenibilidad resilientes. Los edificios deben estar en equilibrio con el medio ambiente, reducir los impactos y aumentar el uso de materiales sostenibles.

#### Tecnología resiliente

Actualmente, el concepto de resiliencia se está desarrollando en las propiedades de los materiales, tales como pavimentos y concretos, a través del cálculo del módulo resiliente. También se desarrolló en diversos campos de la ingeniería (Comfort, Boin & Demchak, 2010), así que puede ser aplicado al diseño de edificios.

Al proponer una edificación resiliente, esta puede tener un modelo organizativo central que controlaría todos

los sistemas del edificio. Es a la vez un *hardware* y *software* que es alimentado por un modelo de tecnología resiliente y un modelo de patrones de adaptación. Este analizaría y procesaría toda la información, para dar respuestas que ayudarían al diseño de edificios más eficientes y resistentes al cambio climático.

La tecnología resiliente es una nueva área de investigación. La complejidad del entorno requiere que los edificios tengan una respuesta similar a la humana. Por lo tanto, la tecnología resiliente se centra en las interdependencias únicas del sistema de control de un edificio. La tecnología integra las constantes interacciones entre el edificio, el entorno y el usuario.

La tecnología resistente tiene en cuenta todos estos elementos, así como las disciplinas que contribuyen a un diseño más eficaz, como la psicología, las ciencias de la computación, la arquitectura y la ingeniería, con el fin de desarrollar una solución interdisciplinaria. Los indicadores de materiales elásticos se utilizan para el análisis de ciclo de vida. Gracias a estos datos, los edificios utilizan materiales resilientes para responder al medio ambiente. Asimismo, el análisis de la tecnología resiliente es útil para diseñar respuestas al cambio extremo del ambiente y evaluar acciones para integrar mejor los sistemas de control, evitando fallos que provocan trastornos en el comportamiento del hábitat humano.

Patrones adaptativos al cambio climático

Por último, los datos que representan los patrones de cambio climático se identifican y se organizan con el fin de crear un modelo de clima general que se puede utilizar para predecir el comportamiento del clima futuro. Con estos sistemas de control de la información, se pueden diseñar edificios para responder de forma automática al cambio climático.

La figura 27 muestra el modelo de administración de ambientes resilientes. Este gráfico consiste en cuatro principales variables independientes de color azul: tecnología resiliente, patrones adaptativos de cambio climático, la calidad del edificio y calidad de vida. A continuación, puede ver cinco variables dependientes: modelo de administración del ambiente, ambientes autosostenibles, edificios resilientes, indicadores de materiales resilientes y análisis de tecnología resiliente.

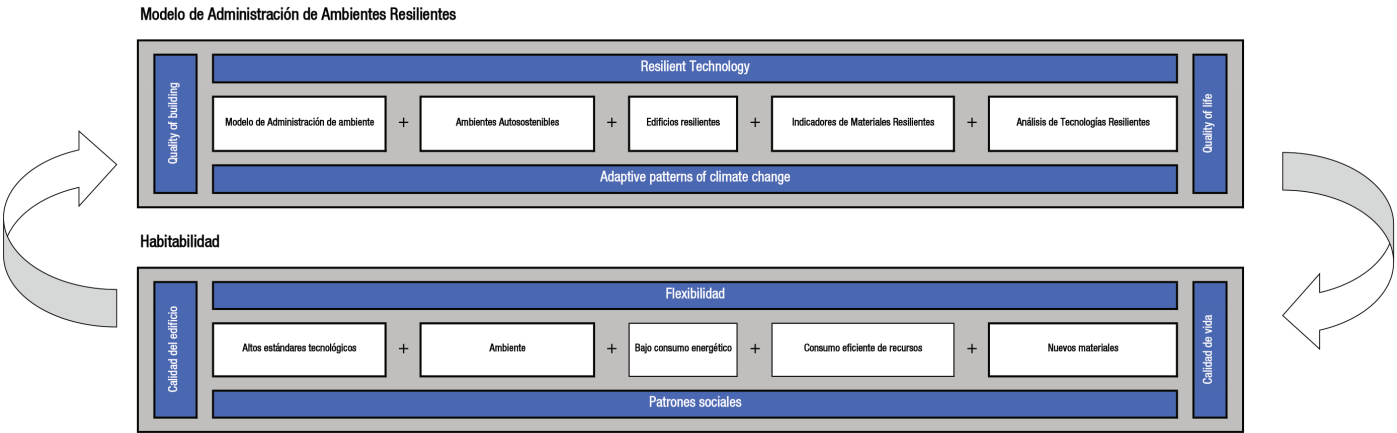


Figura 27. Modelo de administración de ambientes resilientes.  
Fuente: Cubillos, 2015, p. 75.